

行波型超声电机与纵扭型超声电机的比较

陶 征, 刘本学

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于纵扭型超声电机与行波型超声电机发展存在的问题, 笔者分别从超声电机的驱动机理、压电陶瓷逆压电效应的能量转换以及定、转子之间的接触形式三个方面对两种电机进行了详细的分析比较, 指出了纵扭型超声电机比行波型超声电机对提高超声电机的性能更具有潜在的优势; 同时指明当前阻碍纵扭型超声电机发展的几点不利因素。最后, 从发展的角度说明了纵扭型超声电机的发展前景是非常美好的。

关键词: 超声电机; 逆压电效应; 椭圆运动; 模态

中图分类号: TM 356 **文献标识码:** A

0 引言

超声电机是利用压电材料的逆压电效应把电能转换为机体的高频(20 kHz 以上)振动能量, 并依靠摩擦来驱动转子(或滑块)转动(滑块沿直线滑动)的一种全新原理、全新结构的新型动力输出装置。超声电机突破了传统电磁电机的概念, 它无磁且不受磁场的影响。而且, 灵活、紧凑的结构形式、快速的响应特性、较高的扭矩/体积比、低速大扭矩等独特的优点使其在航空、航天、军事、医学等高科技领域拥有传统电磁电机所无法比拟的优势。因此, 在最近的二十几年里, 超声电机事业在世界范围内取得了蓬勃的发展并呈方兴未艾之势。

超声电机按其驱动机理的不同, 可以分为行波型与驻波型两类。就目前来讲, 行波型超声电机(TRUM)的研究相对较为成熟, 并且已在工程中得到了成功应用, 譬如, 在 Canon 公司所生产的彩色复印机、照相机以及美国的火星探测器等^[1]中的应用。与此相反, 属于驻波型的纵扭超声电机(TLUSM)的研究则起步相对较晚, 相关方面的研究还处于探索阶段, 因此, 迄今为止, 尚未有关此类型电机成功应用的报道。为了清楚地认识和了解纵扭型超声电机, 将其和行波型超声电机进行对比研究是非常有必要的。

为此, 笔者将分别从超声电机的驱动机理、定、转子之间的接触方式以及基于压电陶瓷的逆压电效应的机电能量转换三个方面进行详细的探讨和研究。

1 驱动机理的比较

超声电机是利用压电陶瓷(PZT)的逆压电效应激发出弹性体(振子)在超声频段内的微幅振动, 进而使弹性体表面上的质点产生微观的椭圆形运动, 并通过摩擦驱动转子, 从而实现功率的输出和负载的驱动。

由此可见, 振子驱动端表面上质点的椭圆运动是超声电机实现驱动的基本条件。显然, 质点的椭圆运动可以通过多种运动方式的组合而成。然而, 不同的产生方式在一定程度上决定了超声电机的结构形式和电机的基本性能。因此, 通过对超声电机驱动机理的比较, 能够从理论上获得电机在结构上的合理性。

1.1 行波型超声电机的驱动机理分析

行波型超声电机的常见结构如图 1 所示, 它是由压电陶瓷片、带齿的定子弹性体、摩擦材料、转子等组成。转子以一定的压力与定子接触, 定子上的齿起着放大振幅的作用。“+”“-”代表压电片的极化方向相反, 两组压电片空间相差 $\lambda/4$ 波长。

收稿日期:2008-02-05; 修订日期:2009-05-01

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50235010)

作者简介:陶 征(1970-), 男, 河南汝南人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事超声电机的研究。

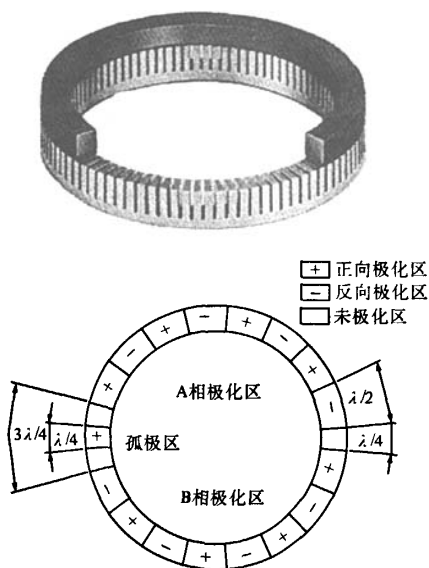


图1 行波型超声电机及压电片的结构

Fig.1 Structure of TRUM and PZT

当压电陶瓷片上通以同频、等幅、相位相差 $\pi/2$ 的超声频域的交流电信号时,定子中便会产生按一定方向旋转的行波,如图2所示.从而使得定子驱动端面上的质点沿一定的椭圆轨迹运动,进而推动被弹簧紧压其上的转子进行旋转,如图3所示.

行波型超声电机的质点椭圆运动形成机理如图4所示.

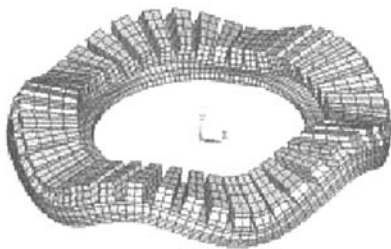


图2 定子的行波振型

Fig.2 Traveling-wave model of stator

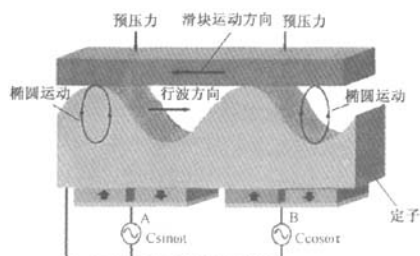


图3 行波型超声电机的运动机理

Fig.3 Driving principles of TRUM

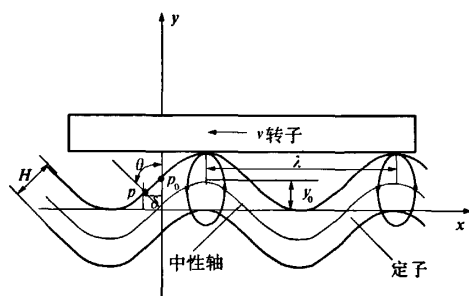


图4 质点椭圆运动的形成机理

Fig.4 The principle on generating elliptical trajectory

其中:定子厚度为 H ;行波波长为 λ ;中性层的振幅为 y_0 ;角速度为 ω_0 .

在图示坐标系下定子中性层的行波方程为:

$$Y = y_0 \sin(2\pi x / \lambda - \omega_0 t) \quad (1)$$

那么对于定子驱动端面上的任一点 p (未发生挠曲时的位置为 p_0) 在时刻 t 的纵向位移为:

$$y = y_0 \sin(2\pi x / \lambda - \omega_0 t) - H(1 - \cos \theta) / 2 \quad (2)$$

由于 $y_0 \ll \lambda$, 则上式可近似表示为:

$$y = y_0 \sin(2\pi x / \lambda - \omega_0 t) \quad (3)$$

由图中可知,当质点由 p_0 运动到 p 时其横向位移 δ 可表示为:

$$\delta = -H\theta / 2 \quad (4)$$

其中: $\theta = dy/dx = y_0 2\pi / \lambda \cos(2\pi x / \lambda - \omega_0 t)$ 为挠曲角由(3)(4)两式整理可得质点的运动方程为:

$$\left(\frac{y}{y_0}\right)^2 + \left[\frac{\delta}{\pi y_0 (H/\lambda)}\right]^2 = 1 \quad (5)$$

可见质点 p 的运动轨迹为一椭圆.

由以上分析可知,对于行波型超声电机而言,其质点椭圆运动上的两个运动分量(垂直方向和水平方向)是相互耦合的.这是因为,定子驱动端面上质点的横向位移是由定子横向振动引起定子薄板的挠曲变形而产生的.换句话说讲,就是质点在水平方向上的运动分量是由法向上的振动诱发而产生的.因此,当质点的法向振动发生改变时势必影响到其在水平方向上的运动状态.这种特点,从本质上决定了行波型超声电机在性能发挥上存在着一定的缺陷.譬如,低速(每分钟几转)大扭矩是超声电机的一项重要特性,可是对于行波型超声电机来讲是一个比较困难的问题.这是因为在一定频率下工作的电机,其驱动端面上质点的水平振幅直接决定着转子的转速大小;因此,为了降低转子的转速,就必须减小其质点在切线方向上的振动幅值.如上所述,质点的切向运动是由定子在法向上的振动诱发而产生的,因此定子驱动

端面上水平振动的减小必需通过降低定子在该向上的振动来实现. 势必减小电机工作时的定、转子之间的接触压力, 进而使得超声电机驱动力矩变小, 从而导致电机在低速下难以继续保持良好的运行. 因此, 由于受驱动机理的限制, 低速大扭矩的特点在行波型超声电机中是很难实现的. 然而, 纵扭型超声电机则不然.

1.2 纵扭型超声电机的驱动机理分析

图 5 所示是一种典型的纵扭型超声电机的结构. 它由转子和定子两部分构成, 纵振陶瓷片和扭振陶瓷片被安置于定子之中, 分别用来激发定子的纵向振动和扭转振动.

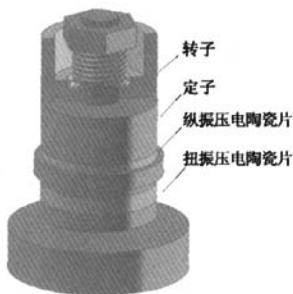


图 5 纵扭型超声电机的结构

Fig. 5 Structure of TLUSM

图 6 是纵扭型超声电机在一个周期内完成驱动过程的示意图. 宏观上来看, 电机在整个工作过程中, 定子对转子的驱动是一个压紧—扭转驱动—脱离—回扭—压紧的循环过程. 扭振提供定子对转子的摩擦驱动力, 纵振和定、转子间的预压力提供产生摩擦力所需的轴向压力.

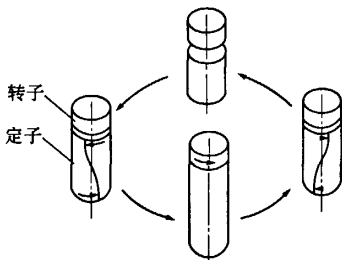


图 6 纵扭型超声电机工作示意图

Fig. 6 Working drawing of TLUSM

由于电机在工作过程中其定子受到纵、扭陶瓷片的激励而产生沿 y 轴的纵向振动和绕 y 轴的扭转振动; 则定子驱动端面上的质点在 y 轴方向上的运动应为

$$U_y = U_{y0} \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

而沿 x 轴切线方向上的运动为

$$U_x = U_{x0} \sin(\omega t) \quad (7)$$

式中: ω 为激振频率; φ 为纵振位移和扭振位移相位差; U_{y0} 、 U_{x0} 分别为纵振位移和扭振位移的振幅.

通过整理可得质点在 x, y 方向上的运动关系为:

$$\frac{U_y^2}{U_{y0}^2} - 2 \frac{U_y U_x}{U_{y0} U_{x0}} \cos \varphi + \frac{U_x^2}{U_{x0}^2} = \sin^2 \varphi \quad (8)$$

式(8)说明质点的运动轨迹为一椭圆. 当 $\varphi = \pm \pi/2$ 时为标准的椭圆.

由上述推导可知, 纵扭电机驱动端质点的椭圆运动与行波型超声电机的质点椭圆运动最大的区别在于纵扭型超声电机的质点在椭圆运动过程中其横向位移和纵向位移是由电机中的纵、扭两种陶瓷片单独激发产生的, 也就是说, 这两个方向上的运动分量是相互独立彼此不相耦合的. 这种特点从理论上讲对电机的驱动性能有着相当大的好处; 这一点可从以下的分析中得到说明.

由于纵扭电机驱动端的质点在纵向和横向上的运动分量是由纵向振动与扭转振动独自激励产生而互不耦合. 那么当保持控制定、转子之间摩擦力大小的纵向振动的幅值不变, 而只改变直接影响电机转速的扭转振动幅值的大小时, 即可达到使电机的转速改变而输出力矩不变, 如图 7 所示.

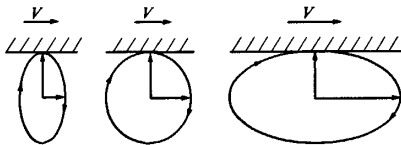


图 7 椭圆运动与纵扭振动幅值的关系

Fig. 7 Relation between ellipse motion and amplitude

纵扭型超声电机的这一特点十分有利于对质点的椭圆运动轨迹进行灵活控制, 因而使得纵扭超声电机较之行波超声电机具有更好的可控性和低速稳定性.

2 基于压电陶瓷逆压电效应的机电能量转换方面的比较

压电效应就是压电材料在机械力的作用下使介质发生电极化的现象. 与之相反, 在外加电场的作用下使压电材料产生机械变形的现象称之为逆压电效应. 压电效应反映了压电晶体的弹性与介电性之间的耦合, 压电方程对此有着明确的表述. 对于超声电机来讲, 只考虑逆压电方程. 则方程式为^[2]:

$$x = d^T E + s^E x \quad (9)$$

式中: x 为压电体的应变矩阵; d 为压电应变常数矩阵; E 为外加电场; s 为压电材料柔度矩阵; σ 为压电体的应力. 上式说明了压电材料在外加电场和外力共同作用下所产生的应变的大小, 它直接反映了材料在机、电转换效率方面的水平; 在一定程度上决定了以压电陶瓷作为能量转换材料的超声电机的工作效率. 由于压电材料的各向异性, 应变矩阵 x 中的各分量分别代表了压电体在不同方向上的应变大小. 在外加电场及其它边界条件一定的情况下, 应变矩阵中各分量的大小取决于矩阵 d 中对应分量的大小. 一个极化过的压电陶瓷其非零压电常数只有 5 个即: $d_{31} = d_{32}, d_{33}, d_{15} = d_{24}$, 试验测得这几个应变常数之间的关系为:

$$d_{33} \geq d_{15} \geq d_{31}.$$

比较行波超声电机与纵扭型超声电机的设计原理可以看出, 行波超声电机是利用压电陶瓷在 d_{31} 方向上的变形激发出定子弹性体的横向弯曲振动而使定子驱动端面上的质点产生椭圆运动来推动电机旋转的; 而纵扭型超声电机则是利用压电陶瓷在 d_{33}, d_{15} 两个方向上的变形使得电机定子同时产生出纵向和扭转两种振动; 从而使其驱动端面的质点形成椭圆运动进而实现电机的工作, 又由于 $d_{33} \geq d_{15} \geq d_{31}$ (d_{15} 的大小一般是 d_{31} 的 5~10 倍)^[3]. 所以, 从理论上讲, 纵扭型超声电机的机电能量转换效率要高于行波型超声电机.

3 定、转子接触方式的比较

如前所述, 超声电机的驱动是通过定、转子之间的摩擦来实现的. 因此在定、转子之间, 摩擦幅的接触方式对超声电机的使用寿命及其力矩的输出有着直接的影响. 对比行波型超声电机和纵、扭型超声电机的驱动机理不难看出, 对于行波型超声电机而言, 其定子驱动端面上的质点椭圆运动的振幅是沿定子驱动表面按正弦规律分布的, 因此, 在定子表面上仅有处于行波波峰附近的质点才与转子接触 (如图 3 所示). 这种接触方式使得定、转子之间因摩擦力比较集中而容易出现相对滑动产生磨损并在一定程度上限制了电机的输出力矩; 然而, 纵扭型超声电机则不同 (由图 6 可以看出), 其接触表面上的质点皆以相同的相位在其平衡位置附近作椭圆振动; 在任何时刻, 接触表面的质点振动幅值皆相同, 因而使得定、转子之间是以面接触的形式来进行接触的. 这种接触方式的改变决定了两类超声电机在驱动特性方面必定存在着显著的差别, 理论上讲, 纵扭型超声电机能

够产生更大的驱动力矩.

基于以上的分析, 我们以本中心所研制的两台不同结构形式的, 直径为 $\Phi 45$ 的纵扭型超声电机和两种直径分别为 $\Phi 45$ 、 $\Phi 60$ 的行波型超声电机以及两台日本的 $\Phi 45$ 、 $\Phi 60$ 行波型超声电机为研究对象, 通过 CC50K 磁滞测功机进行了大量的实验测试对比, 结果显示: 两台纵扭型电机的最大转矩均达到了 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 而行波型超声电机, (无论是自己研制的还是日本的), $\Phi 45$ 的最大转矩一般小于 $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$; $\Phi 60$ 的最大转矩只有 $0.8 \sim 0.9 \text{ N} \cdot \text{m}$. 另据相关文献的报道, 浙江大学研制的直径为 $\Phi 80$ 的纵扭型超声电机最大扭矩为 $13 \text{ N} \cdot \text{m}$ ^[4], 而日本研制的一台纵、扭型超声电机, 其最大扭矩已达 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ ^[5]. 很显然, 与我们的分析是吻合的.

4 结论

纵扭型超声电机是当前驻波型超声电机的主要形式, 而行波型超声电机则是目前研究最为成熟并获得应用的电机. 然而, 通过对二者的质点椭圆运动的形成机理、逆压电效应下压电陶瓷的能量转换以及电机的定、转子之间的接触形式 3 方面的分析比较和相关的实验验证, 不难从理论上得出这样的结论: 纵扭型超声电机在其结构设计方面较之行波型超声电机具有更大的发展优势.

然而, 不可否认纵扭型超声电机目前尚未有成功应用的例证. 究其原因主要有如下 3 点: ①设计条件苛刻. ②安装困难. ③成本较之其它超声电机相对较高.

设计条件苛刻主要是指在纵扭型超声电机设计过程中要使振子的纵、扭两种模态的固有频率达到或者接近一致性. 这对于纵扭型超声电机来讲是非常重要的, 但实现起来又是非常困难的. 关于这个问题已经有不少的文献对此专门进行了探讨, 在此不再赘述.

安装困难是指由于安装所造成的振子边界条件的改变对振子振型的影响比较显著, 从而使电机的性能降低, 一般达不到设计时的要求.

成本较高主要体现在扭振陶瓷片的制作费用上. 目前, 一般每片扭振陶瓷的制作成本是其它陶瓷的 10 倍左右. 这是由其特殊的加工方式决定的.

尽管有以上三个问题的存在, 以至于限制、影响了纵扭型超声电机的开发和应用. 但我们完全相信, 这些问题随着技术进步和研究的深入一定

能够得到克服或改善,从而使纵扭型超声电机在工程中能够获得广泛的应用。

参考文献:

- [1] 赵淳生. 21 世纪超声电机技术展望[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 120(1): 7-8.
- [2] 陈永校, 郭吉丰. 超声波电动机[M]. 杭州: 浙江大学出版社.

- [3] 王矜奉, 姜祖桐, 石瑞达. 压电振动[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 123(5): 80-85.
- [4] 郭吉丰, 魏燕定. 纵扭复合型超声波电机的力传递模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 123(5): 80-85.
- [5] 赵横兵, 刘晓东, 陈永校. 大扭矩超声电机的结构分析[J]. 微特电机, 1999, (4): 15-18.

Comparison of the Traveling-wave Ultrasonic Motor with the Ultrasonic Motor Using Longitudinal and Torsional Vibration Model

TAO Zheng, LIU Ben-xue

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on current development of the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration modes and the traveling-wave ultrasonic-motor, this paper analyze them in detail from three aspects: driving mechanics of the ultrasonic-motor, energy conversion based on convert piezoelectric effect of piezoelectric ceramic and contact form between stator and rotor; it points out that the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration models has more dominance to improve performance of the motor than the traveling-wave types; also, it briefly illustrates some disadvantages on preventing the development of the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration modes. Finally, this paper indicates that the perspective of the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration model is beautiful.

Key words: ultrasonic motor; convert piezoelectric effect; elliptical movement; model

(上接第 55 页)

Establishment and Security Evaluation of Crack Model on Cement Rotary Kiln

YANG Gen-xi, LI Ju-li

(Mechanical and Electronic Engineering Department, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The rotary kiln is one of the key equipment in the cement production line, which greatly affects the yield and quality of product. Focusing on the question of the cement rotary kiln's weld line crack along the axis of the tube body, the mechanics analysis was made based on the belt and the tube body. The result indicated that the stresses which bring forth the weld line crack mainly include bending stress, temperature stress, residual stress, etc. This paper established a mechanics model of weld line crack on tube body, while the fracture mechanics and elastic and plastic mechanical were taken into account, and the fracture criterion of weld line crack was made according to the stress intensity factor. Through the security evaluation of the crack, the spot crack statistics verified the accuracy of the model and the evaluation method, and the crack critical size was proved to be 141 mm.

Key words: rotary kiln; fracture mechanics; crack; security evaluation